

GNSS 代替としてのマルチ DME 測位の国内適用性評価

航法システム領域 ※毛塚 敦，齊藤 真二，長谷川 努，高島 宗彦，尾関 友啓

1 まえがき

GNSS（Global Navigation Satellite System）は航空機の RNAV 航法において利用されているが、近年、干渉[1]やスプーフィング[2]が多発しており、使用できない状況が発生している。APNT（Alternate Positioning, Navigation and Timing）は GNSS 障害時に測位、航法、時刻同期を提供するバックアップであり、その構築が ICAO での検討課題となっている。

バックアップシステムの候補の一つとして、航空用測距装置である DME (Distance Measuring Equipment) の性能改善により実現する方法が提案されており[3][4]，その中でマルチ DME 測位はエンルートと出発／到着経路（SID／STAR）を複数の DME 局による測位で実現する方式である[5]-[7]。我が国は DME が数多く設置されているため、GNSS のバックアップとしてマルチ DME 測位は有力な候補であり、その適用性について詳細に評価する必要がある。本発表では、飛行実験によりマルチ DME 測位の適用性を評価したので報告する。

2 マルチ DME 測位

DME は機上装置（インタロゲータ）と地上装置（トランスポンダ）で構成され、機上装置から発出されたパルスを一定時間後に地上装置が返送する。航空機では、パルス発出から受信までの伝搬時間から航空機と地上装置間の距離を計算することができ、パイロットへ距離情報を提供する。

DME 2 局と IRU（慣性航法装置）用いた DME/DME/IRU 測位方式は RNAV 航法において既に使用されているが、インテグリティ性能（測位異常時にシステムを遮断する能力）を持たないため、自立航法の要件が必要な経路には使用できない。近年、我が国において整備が進められている RNP 経路はインテグリティ性能が必要であり、その性能を有する GNSS のみが航法装置として利用でき、DME/DME/IRU 測位

方式を GNSS バックアップとして適用することはできない。そこで、2 局ではなく、図 1 に示すように複数の地上 DME 局を利用する測位方式とすることでインテグリティ性能を付加する検討が欧州を中心に行われている。マルチ DME 測位では、図 1 に示すように測距誤差により測位解は一意に定まらないため、GNSS と同様に最小二乗法を用いて測位解を算出している。そして、複数局を使用することにより、異常が生じている地上 DME 局を検出し、排除することが可能となる[8]。本発表では、まずは測位精度に着目し、飛行実験により我が国での性能を評価した。

3 実験用機材

飛行実験評価で使用した電子航法研究所所有の実験用航空機および DME パルスアナライザ EDS300 を図 2 に示す。EDS300 はキャビン前方

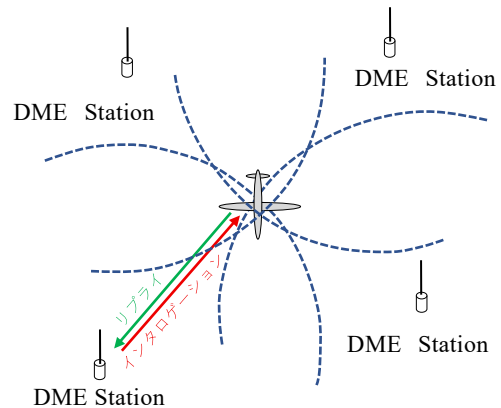


図 1 マルチ DME 測位の原理



図 2 実験用航空機と測定機材

のラックへ設置した。EDS300 は 10 局の地上 DME 局を同時に捕捉し、測距する機能を有する。機体下部に設置された L バンドアンテナを通じて、複数の地上 DME 局との測距を行った。GNSS は一般的に DME に比べて高精度であるため、別途機体に設置されている GNSS 受信機で得られる測位位置を真位置として記録し、測距誤差および測位誤差の評価で使用した。

4 飛行実験による評価結果

4.1 実験空域

飛行実験では、DME 局が豊富に存在し、山岳等による遮蔽が少ない条件の良いエリアとして成田空港ターミナル空域を選定した。また、山岳による遮蔽が想定される条件の悪いエリアとして仙台空港ターミナル空域を選定し、それぞれ出発経路にて評価を行った。

4.2 成田空港における評価結果

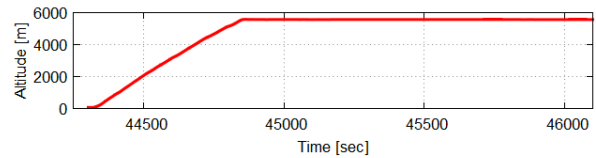
成田空港では、滑走路ローパスでの飛行後に出発経路である TETRAEIGHT DEPARTURE および KIMIN TRANSITION にて測位精度評価を行った。飛行経路を図 3 に示す。図 3 より、地上 DME 局数が周囲に豊富に存在し、また関東平野であるため、山岳による遮蔽が少なく、良い条件であると考えられる。



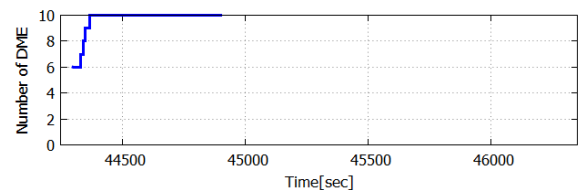
16L TETRAEIGHT DEP KIMIN TR

図 3 成田空港出発経路

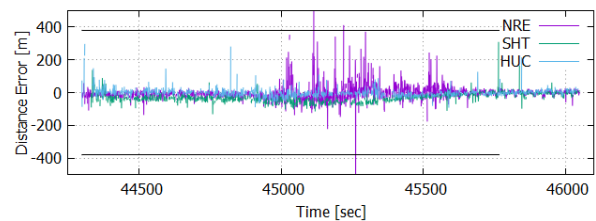
図 4(a)～(d)に飛行高度、捕捉 DME 数、測距誤差および測位誤差を示す。図 4(a)および図 4(b)より、滑走路上（ローパス時）から 6 局の DME を捕捉できていることが分かる。また、上昇とともに直ちに 10 局の DME が捕捉できていることが分かる。マルチ DME の一例として、図 4(c)は NRE（成田）、SHT（下総）、HUC（阿見）それぞれの地上局との測距誤差を示している。所々スパイク状の誤差が観測されているものの、全体として飛行検査合格基準（0.2NM、図中の黒線）と比べて誤差が小さいことが分かる。なお、45000～45500sec において NRE 局で発生した連続するスパイク誤差については、この時間の航空機の位置が NRE 局



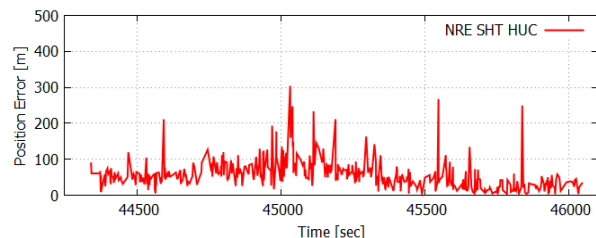
(a) 飛行高度



(b) DME 局数



(c) 測距誤差



(d) 測位誤差

16L TETRAEIGHT DEP KIMIN TR

図 4 成田空港に出発経路におけるマルチ DME 性能評価

直上であったために発生したものと考えられる。図4(d)に示すように、図4(c)の3局を用いた場合の測位誤差は100m程度に抑えられていることが分かった。以上より、成田空港周辺では低高度でも多くのDMEが利用でき、マルチDME測位が適用しやすい空域であることが分かった。

なお、解析において、DMEアナライザによるデータ取得時刻と真位置であるGNSS受信機の取得時刻と同時刻となるように補間しているが、実際にはそれら時刻の同期にわずかな差が発生しており、測距および測位結果に影響を与えている。本解析においては、その時刻同期誤差を1秒として補正した。

4.3 仙台空港における評価結果

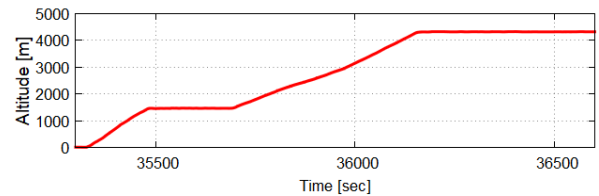
仙台空港では、STEEDFOUR DEPARTUREおよびRIKYU TRANSITIONにおいて評価を行った。飛行経路を図5に示す。図5より、DMEの数は成田空港より少なく、かつDMEを遮蔽する山岳が多く存在することが分かる。図6(a)～(d)に飛行高度、捕捉されたDME数、測距誤差および測位誤差を示す。図6(a)および図6(b)に示すように、滑走路（ローパス時）には2局のDMEのみが捕捉可能であった。これは、図6(c)の測距誤差の結果でも示している



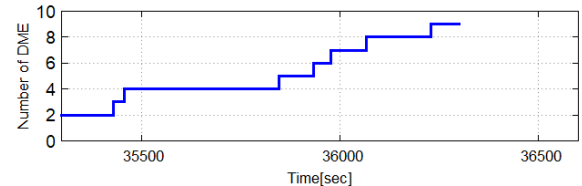
STEEDFOUR DEP RIKYU TR

図5 仙台空港出発経路

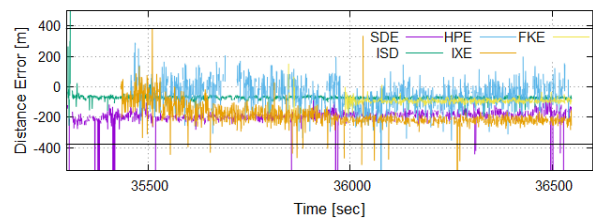
とおり、SDE（仙台局）とISD（ILS用T-DME）である。高度が1000m程度に達するとHPE（花巻）およびIXE（いわき）が捕捉可能となり、さらにFKE（福島）は高度が2000m程度になってから捕捉可能であったことが分かる。図6(d)の測位結果が示すとおり、FKE局との測距が開始される前の段階でSDE, ISD, HPEおよびIXEの4局でマルチDME測位を行った場合には、大きな測距誤差が生じていることが分かる。しかし、高度が上がりFKE局が捕捉可能となると、安定した測位解が得られることが分かる。この理由としては、図5に示すとおりSDE, ISD, HPE, IXEの4局は一直線状に配置されており、かつその直線に沿って出発経路が存在するためであると考えられる。測位の点においては、航



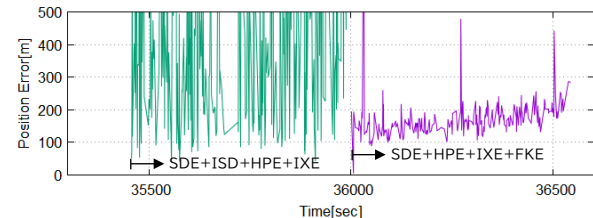
(a) 飛行高度



(b) DME 局数



(c) 測距誤差



(d) 測位誤差

STEEDFOUR DEP RIKYU TR

図6 仙台空港出発経路における
マルチDME性能評価

空路の周りに偏りなく DME 地上局が存在することが望ましいが、山岳遮蔽の影響により YTE や FKE が捕捉できず、偏った配置での測位となったために誤差が発生したのと考えられる。FKE はこの直線から外れているため、FKE を捕捉し、測位に使用できるようになると測位解が安定し、誤差が小さくなったものと考えられる。

我が国は、南北に長く、かつ中央部には山脈が存在する特徴的な国土を有する。これにより、太平洋側沿岸部を低高度で飛行する際、日本海側に設置されている DME はカバレッジ内であったとしても山岳による遮蔽で利用できなくなることが懸念される。同様に、日本海側を飛行する際には、山岳の影響により太平洋側に設置された DME は利用できない恐れがある。また DME は沿岸部付近に設置されている場合が多いため、利用できる DME 局の配置が一直線上に並ぶことが懸念される。このような状況はマルチ DME 測位にとっては悪条件とあり、測位精度の劣化につながる。これらは我が国特有の課題であり、GNSS 障害時のバックアップとしてマルチ DME 測位を導入する際の課題であると考えられる。

5 まとめ

近年増大する GNSS 障害に備え、バックアップ方式の候補の一つであるマルチ DME 測位について、国内適用性を飛行実験により評価した。その結果、平野部にある成田空港は山岳による遮蔽が少なく、かつ航空路に対して万遍なく多くの DME が存在するため、マルチ DME により高精度に測位可能であることが分かった。成田空港は交通量が多く、GNSS 障害時への対策が重要なため、マルチ DME 測位は GNSS バックアップの有力な手段になりうるものと考えられる。一方で、山岳部においては配置について課題があることを示した。我が国は DME が豊富に設置されている反面、特徴的な国土のために、現状の配置のままでは十分な測位性能が得られないこと懸念される。DME の RNP 利用の面から DME の再配置において考慮すべきであるものと考えられる。今後は山岳地域における上記課題をより詳細に調査する予定である。

参考文献

- [1] EUROCONTROL Think Paper #9 - Radio Frequency Interference to satellite navigation: An active threat for aviation? PUBLISHED 1 MARCH 2021
- [2] Z. Liu, S. Lo, J. Blanch, Y. Chen, T. Walter, "GNSS Spoofing and Jamming in Eastern Europe," InsideGNSS, March 26, 2024
- [3] Robert W. Lilley, Robert Erikson, "DME/DME for Alternative Position, Navigation, and Timing (APNT)", APNT White Paper, Mar. 1, 2012
- [4] Berz, G., Vitan, V., Skyrda, I., "Can Current DME Support PBN Operations with Integrity?," Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), Nashville, TN, September 2013, pp. 233-250.
- [5] SESAR2020 PJ14 Final Project Report, SESAR JU, 18 December 2019
- [6] Xiao Liang, Carl Milner, Christophe Macabiau and Philippe Estival, "Multi-DMEs for alternative position, navigation and timing (APNT)," The Journal of Navigation, Vol.75, Issue 3, pp.625-645, May 2022
- [7] Ivan OSTROUMOV, Karen MARAIS, Nataliia KUZMENKO, "AIRCRAFT POSITIONING USING MULTIPLE DISTANCE MEASUREMENTS AND SPLINE PREDICTION," VILNIUS TECH Journals, AVIATION, Vol.26, No.1, 2022
- [8] 毛塚 敦, 田嶋裕久, "成田空港飛行実験によるマルチ DME 測位と DME-RAIM の有効性に関する基礎検討," 電子情報通信学会技術報告 vol. 123, no. 92, SANE2023-16, pp. 7-10, 2023 年 6 月 30 日

謝辞

本実験を実施するにあたりご協力いただきました国土交通省航空局交通管制部管制課、東京航空局東京空港事務所、交通管制部管制技術課航行支援技術高度化企画室および関係各署に感謝いたします。